

综述

磁共振弥散加权成像技术在脊柱外科的应用及进展

Application and progress of diffusion weighted magnetic resonance imaging in spinal surgery

汤津池,王 野,朱庆三,夏子博,邬佼汐,栾双蔚,武云涛

(吉林大学中日联谊医院 130033 长春市)

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2020.01.12

中图分类号:R445.2,R681.5 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2020)-01-0082-04

弥散成像技术出现于 20 世纪 50 年代,通过非侵入性检测人体组织水质子的弥散运动而进行成像,能直观地反映组织微观结构。以此原理为基础结合磁共振成像(magnetic resonance imaging,MRI)而产生的磁共振弥散加权成像(diffusion weighted imaging,DWI),作为 MRI 技术的创新与发展,以其区别常规 MRI 的成像特点及优势,目前已被广泛应用于诸多临床科室,对于全身各类组织及器官的疾病诊断及鉴别。DWI 技术在脊柱外科的应用起步晚、局限多、阻碍大,因此相关应用报道相对较少。笔者就目前 DWI 技术在脊柱外科领域的应用及进展进行综述。

1 DWI 的基本原理及发展

弥散,也称扩散,是指分子在媒介中产生随机无规律且永不停止的热运动(Brownian motion,布朗运动)的现象。分子的弥散速度因所处的媒介及环境差异而表现不同。基于此,人体组织中的水分子因受周围介质的约束,其无序扩散运动的信息差异则可通过转化为图像的灰度信号或其他参考值而被直观化呈现。Hahn^[1]于 1950 年发现了水弥散对磁共振信号的影响,为 DWI 的出现奠定了基础。Stejskal 等^[2]在 1965 年提出了一种扩散敏感的短梯度脉冲序列,实现水弥散的 MR 检测。DWI 是在自旋回波(spin echo,SE)序列中的 180°脉冲两侧各施加一对大小方向相同且对扩散敏感的梯度脉冲,来检测水分子的弥散。因活体内水分子的自由弥散程度小于其他环境,因此用表现弥散系数(apparent diffusion coefficient,ADC)来衡量水分子在人体组织环境中的弥散运动,在扩散敏感系数 b 值固定不变的情况下,ADC 值越大,水分子弥散能力越强。Le 等^[3]在 1986 年首次将 DWI 用于神经疾病的诊断。1998 年 Nagayoshi 等^[4]利用 DWI 检测正常人颈髓的灰质与白质,以此来评估缺血性或脱髓鞘病等白质疾病,自此 DWI 技术开始逐渐应用于脊柱外科。

2 DWI 在脊柱外科的应用

脊椎疾病现有的常规检查包括:X 线(X-ray)、CT 及 MRI。与之相比 DWI 具有:①无辐射;②避免使用造影剂;③鉴别细胞毒性水肿及血管源性水肿;④可重复性等优势。近年来相关文献报道了 DWI 在椎体压缩骨折、脊髓损伤、脊柱肿瘤、脊柱感染性疾病及脊椎退行性疾病的诊断方面的应用。

2.1 椎体压缩骨折(vertebral compression fractures,VCF)

单纯性压缩性骨折和病理性压缩骨折是临床上两种常见的椎体骨折类型。一般我们将椎体因骨质疏松或外伤引起的单纯性压缩性骨折称为良性椎体压缩骨折(BVCF),将继续发于恶性肿瘤或严重感染的骨折称为恶性椎体压缩骨折(MVCF)。BVCF 在急性期由于骨髓内出血、水肿、变性反应等原因,常规 MRI 表现为 T1WI 低信号,T2WI 高信号,STIR 高信号。MVCF 由于骨髓中的脂肪组织逐渐被肿瘤组织代替,MRI 检测可呈现出类似的信号改变^[5]。在少数情况下,两种病变间的信号改变相互混杂,难以鉴别,这给定性诊断带来相当大的困难,也直接影响了后续治疗方案的选择。因此有学者使用 DWI 对二者进行鉴别。BVCF 引起局部骨髓充血水肿,引起细胞外水分子增多,使水弥散速度加快,因此 ADC 值增高,DWI 表现低信号;MVCF 因为骨髓内肿瘤细胞浸润,细胞外空间减少,水弥散速度减慢,ADC 值减低,DWI 表现高信号。然而许多研究其结果呈现为 BVCF 与 MVCF 均表现为 DWI 高信号,也有少数研究结果为两组均可在 DWI 上表现为无特异性的高、等、低信号^[6]。有学者认为这是由于各个研究所选取的 b 值、弥散序列参数、感兴趣区(ROI)的存在差异。卢莹莹等^[7]通过测定不同 b 值(0、200、400、600、800s/mm²)时病变椎体的 ADC 值,并分别计算出各个 ADC 最大值、最小值、平均值以及最大值差值、最小值差值、平均值差值。结果发现,在 b 值为 50、200、400s/mm²时,上述数值在良性骨折椎体间的差异有统计学意义,其中 ADC 平均值差值准确性最高。b 值为 800s/mm²时,病变椎体的 ROI 信号强度(SI)亦有重要鉴别意义。将二者联合起来,若病变椎体的 ADC 值 $\leq 1.337 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$ 或是 SI ≥ 89.750 ,即可诊断为 MVCF。

第一作者简介:男(1994-),硕士研究生在读,研究方向:脊柱外科
电话:(0431)84996931 E-mail:tangjinchi6@163.com
通讯作者:武云涛 E-mail:wuli2000@126.com

这一方法为今后鉴别 BVCF 与 MVCF 提供了新的思路。

2.2 脊髓损伤(spinal cord injury)

脊髓损伤可以依据脊髓受压时间长短分为急性脊髓损伤(acute spinal cord injury, ASCI)与慢性脊髓损伤,前者以各种意外事故造成的外伤为主,后者则以脊髓型颈椎病(cervical spondylotic myelopathy, CSM)为代表。

2.2.1 急性脊髓损伤 ASCI 患者中以颈部脊髓损伤最为多见,约占脊髓损伤的 55%^[8]。ASCI 通常会引起严重的并发症,早期诊断对于伤者的治疗及预后具有十分重要的意义。脊髓损伤后将发生一系列的病理性改变包括:①水肿;②缺血;③坏死;④增生;⑤囊性变等,这些改变在 MRI T2WI 表现为高信号,是诊断 ASCI 的重要标志。但是上述病理学改变需要一定的发展过程,出现这些征象时脊髓损伤通常也已达到一定的程度^[9],因此 MRI 对于判断脊髓损伤程度及损伤时间帮助有限。而对于无骨折脱位型脊髓损伤(spinal cord injury without radiographic abnormality, SCIWORA),实现早期诊断则更加困难。有研究报道,脊髓损伤 15min 后, DWI 即可在影像学上呈阳性表现,远远早于常规 MRI 的 6~12h。DWI 能够反映脊髓损伤病理改变及水分子扩散情况,尤其是水分子受轴突膜限制或阻碍的情况^[10],从而对脊髓受损程度做出一定的判断。Zhang 等^[11]对 20 例 ASCI 患者在受伤后 72h 内行 DWI 检测,发现对于不同类型的脊髓损伤(水肿型、出血型、混合型)均有诊断价值,且 DWI 还有助于区分细胞毒性水肿与血管源性水肿。Schwartz 等^[12]认为患者的功能能力恢复主要由白质受损程度决定,而 DWI 可以通过探测水分子在脊髓束的扩散过程,反映脊髓束的功能完整性,因此对 ASCI 的预后有一定的价值。

2.2.2 脊髓型颈椎病 CSM 是指由于颈椎椎骨间连接结构退变,最终导致脊髓受压或脊髓供血障碍,表现出脊髓功能障碍。常规 MRI 可以了解颈椎间盘突出及椎管狭窄程度、有无韧带增厚或钙化以及脊髓受压程度,进一步可了解脊髓有无变性。其中以 T2WI 最为敏感,受压脊髓内高信号往往提示脊髓变性。但常规 MRI 在早期 CSM 脊髓异常变化的敏感度较低, DWI 则可以弥补这一短处。当脊髓发生轴突水肿或脱髓鞘等病理改变时,脊髓束的水分子扩散各向异性会发生改变, DWI 信号相应发生改变。Monika 等^[13]将 50 例 CSM 患者依据欧洲脊髓病评分系统分为 1 级(轻度)、2 级(中度)和 3 级(重度)三个组,分别进行 DWI 和常规 MRI 检测。结果表明, T2WI 对于 2 级与 3 级患者脊髓损伤的检测意义显著,而对于 1 级及以下的患者, ADC 的敏感度为 71%, 远高于 T2WI。相关研究证明, CSM 患者髓内水分子扩散增加、ADC 值升高^[14]。

随着影像学的发展,以 DWI 为基础衍生了很多新技术,其中弥散张量成像(DTI)技术因能够反映水分子的弥散各向异性,无创地跟踪及观察神经纤维的走行及完整性,已经被广泛接受并更多应用于脊髓损伤的诊治中^[15]。不同于 DWI 只用 ADC 一个描述参数, DTI 技术利用部分

各向异性 FA、相对各向异性 RA、各向异性指数 AI 等多个描述参数在三维空间内定时定量的分析组织内水分子的弥散特性,因此对于脊髓微观结构的病理及生理改变更加敏感。目前越来越多学者认为 FA 值的变化能够更早、更准确地发现 CSM 的脊髓病变。

2.3 脊柱肿瘤

2.3.1 椎体转移瘤(vertebral metastases) 椎体是转移瘤的好发部位,据报道椎体转移约占人体骨转移 65%^[16],其中以胸椎转移瘤最为多见。核素骨显像能够在早期检测到脊柱转移瘤,为筛查骨转移瘤的首选方法,其诊断敏感性高达 98%,更早于 X 线及 CT 发现病灶,但其特异性低,容易将血管瘤、炎症等误判为阳性^[17]。DWI 对于早期椎体转移瘤有着较高的敏感度与特异性,已有学者将其应用于椎体转移瘤的诊断。Pozzie 等^[18]对 65 例椎体转移瘤进行 T1WI、T2WI、STIR 及 DWI 检测,测得病变椎体平均 ADC 值为 $1.02 \pm 0.25 (0.73 \sim 1.96) \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$,在 DWI 上均呈现为高信号。转移瘤组织中含水量增加,且组织结构及细胞破坏引起水分子自由扩散受限,这与上述结果相符合。DWI 也同样可被用于脊椎转移瘤治疗后的疗效评价^[19]。骨肿瘤术后的肿瘤复发在常规 MRI 上与水肿、炎症及感染表现相似。同鉴别椎体良恶性压缩骨折的病理基础类似,前者的 ADC 值通常降低,后者 ADC 值增高。因此可以通过测定 ADC 值来判断术后肿瘤有无复发。也有学者研究了 DWI 对转移瘤放疗效果评估的价值。Byun 等^[20]对 24 例椎体转移瘤患者在放疗前后均行 DWI 检测并将结果对比发现,放疗前所有病灶表现为 DWI 高信号, ADC 值为 $(0.78 \pm 0.03) \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$,放疗后 1 个月 DWI 呈低信号, ADC 值上升为 $(122 \pm 0.22) \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$ 。经过放疗后,肿瘤细胞减少使得细胞外空间增大,水弥散程度增强,可见放疗对转移瘤的疗效。

2.3.2 原发性脊柱肿瘤 DWI 也丰富了原发性脊柱肿瘤的诊断方法。张禹等^[21]认为 ADC 图能够清晰地反应骨巨细胞瘤实质部分以区别于囊性变、坏死以及水肿区域。也有学者^[22]利用 DWI 辅助磁共振动态增强技术(DCE-MRI)鉴别骶骨脊索瘤与骨巨细胞瘤。脊柱良恶性肿瘤病变的常规 MRI 信号缺乏特异性,且判断较主观化,对于定性诊断帮助有限。吕金纯等^[23]对 41 例骨肌系统肿瘤病变(血管瘤、骨巨细胞瘤、软骨瘤、脊索瘤、骨肉瘤等)进行 DWI 检测,发现恶性肿瘤的 ADC 值存在显著差异(恶性组更低),当 b 值为 $1000 \text{s}/\text{mm}^2$ 时诊断效能最佳。

目前,以 DTI 技术为基础演变而生的弥散峰度成像(DKI)技术,因其所基于的非高斯分布模型更接近人体组织结构内水分子的扩散模式,且所需至少 15 个弥散方向和 3 个 b 值,因此对于水分子的弥散受限比 DWI 更加敏感,对水分子弥散的不均一性也相当敏感^[24]。DKI 技术能够检测肿瘤内部以及不同级别肿瘤之间微观结构的差异,为椎体肿瘤的鉴别与分级、疗效评估、预后等方面提供更有力理论依据。尽管 DWI 在该方面的地位逐渐下降,但其

对于脊柱肿瘤的诊断及预后仍有意义。

2.4 脊柱感染性疾病

2.4.1 脊柱结核(spinal tuberculosis) 脊柱结核发病占全身骨关节结核首位,诊断及治疗不及时会导致椎体骨质破坏、坏死、脓肿形成、脊柱畸形、神经损害等严重并发症。常规 MRI 对于脊柱结核造成的椎体破坏、脓肿、硬膜外囊肿与脊髓受压、坏死与钙化灶的诊断敏感性分别为 90%、80%、74.5%、16.3%^[25]。近年来非典型性脊柱结核数量不断增多,如单椎体中心型结核、椎间盘型结核、非相邻椎体结核(跳跃性结核)等^[26],其在常规 MRI 表现出的特殊性与不典型性为临床诊断增加了困难。对此,DWI 可以作为常规 MRI 的补充。刘莹等^[27]利用家兔建立脊柱结核模型,并在术后 4、6、8 周行传统 MRI 和 DWI 检测,研究发现病变椎体 ADC 值明显高于正常椎体,且具有统计学意义。Madhok 等^[28]对 55 例脊柱结核患者回顾性分析了 MRI 及 DWI 检测结果,结果发现结核感染椎体的平均 ADC 值为 $(1.47 \pm 0.25) \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$,正常椎体的平均 ADC 值为 $(0.48 \pm 0.16) \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$,且在治疗后椎体 ADC 值逐渐下降,感染完全消退的椎体 ADC 值接近正常椎体。综上,DWI 可以反映出脊柱结核的病情发展及治疗效果,常规 MRI 结合 DWI 对于脊柱结核的早期诊断及预后具有更大的意义。

2.4.2 布氏杆菌性脊柱炎(Brucellar spondylitis) BS 是指布氏杆菌侵袭脊柱椎间盘或椎体引发的感染性病变。其临床症状与脊柱结核类似,包括:发热、盗汗及腰背痛等。此外,红细胞沉降率(ESR)、c-反应蛋白(CPR)等感染检验指标均可升高。在影像学方面,BS 亦可表现为骨质破坏、椎间隙狭窄、椎旁脓肿及骨质异常增生等^[29]。因此两者的鉴别难度较大,易引起误诊。目前二者的鉴别主要依靠的是常规 MRI 序列,但也有学者提出 DWI 对此更敏感。有研究^[30]结果表明,BS 病变椎体的平均 ADC 值与脊柱结核相关数值有明显区别,前者低于后者。这可能与两者的椎体破坏类型有关,脊柱结核以溶骨性破坏为主,常伴有局限性脓肿;BS 以肉芽肿性变化为主,局限性脓肿少见。此外,吴明^[31]等对 60 例 BS 患者行 DWI 检测,发现受累的椎间盘的 ADC 值在急性期、亚急性期及慢性期均有不同程度增高,而在治疗 6 个月及 12 个月后 ADC 值降低,差异有统计学意义(慢性期除外),表明 ADC 值对评估 BS 预后亦具有指导意义。

2.4.3 非特异位化脓性脊柱炎(non-specific pyogenic spondylitis,NPS) NPS 发病率低,由于起病隐匿,发展阶段临床症状与影像学表现酷似脊柱结核,因此误诊现象屡有报道^[32]。NPS 因炎症所致静脉充血、水肿、渗出及坏死导致脊髓细胞水分增加,因此常规 MRI T1WI、T2WI 及 STIR 均有重要诊断价值。当鉴别困难时,组织病理学检查则成为了最可靠的检测手段^[33]。目前涉及 NPS 的 DWI 技术相关研究很少。仅有学者^[34]提出 DWI 可以在 NPS 早期准确地发现硬膜外间隙、椎旁肌、髂腰肌、椎体和椎间盘内的脓肿以及脓液聚集,以区别于术后积液、囊性肿瘤、血肿、脑

脊液漏以及非典型椎间盘退变与椎间关节改变。

2.5 脊柱退行性疾病

近年来,DWI 技术同样开始被应用于脊柱退行性疾病的相关研究。DWI 能够依据水分子的弥散运动分析椎间盘的状态。椎间盘髓核的 ADC 值能客观反映出椎间盘纤维环和髓核的含水量改变情况,并对退变做出定量评价。Byva 等^[35]通过对 57 例志愿者的 281 例椎间盘进行研究,发现椎间盘的 ADC 值与其 Pfirrmann 分型呈明显负相关性。其中 Pfirrmann 分型 1 级椎间盘的 ADC 值均值为 $2.16 \pm 0.04 \text{mm}^2/\text{s}$,而 5 级的均值为 $1.61 \pm 0.12 \text{mm}^2/\text{s}$ 。也有学者^[36]以年龄、体重及症状为出发点,研究了椎间盘 ADC 值与其相关性。结果表明,受试者年龄越大、体重指数越大、因间盘退变引起的疼痛程度越高,ADC 值越小。这从侧面也进一步证明了 ADC 值对于椎间盘退变评估的意义。目前,基于 ADC 值的椎间盘退变程度的分级尚未有明确标准,但在未来 DWI 技术对于腰椎退行性疾病的诊断、分期及预后必将占有重要一席。

3 DWI 的局限与展望

由于脊髓的解剖结构及周围组织的生理特点使得 DWI 在脊柱外科领域的应用受到了很大的限制:①脊髓横截面积小,成像难度大,要求分辨率高,标准扫描会导致图像信噪比低;②脊髓 DWI 的部分容积效应,由于脑脊液的 ADC 值高,这会对脊髓边缘 ADC 值的测定带来影响;③呼吸、心跳、吞咽及脑脊液波动等生理性活动可引起运动伪影^[37]。但 MRI 及 DWI 技术始终在发展着,不断出现了磁共振全身弥散加权成像(whole body diffusion-weighted imaging,WB-DWI)、背景抑制弥散加权成像技术(DWIBS)、并行采集技术(PTA)、螺旋桨扫描技术(PROPELLER)、小 FOV 扩散加权成像技术等^[38],使得 DWI 在数据采集、成像分辨率、消除伪影方面有了巨大的进步。随着影像硬件系统的升级迭代与图像处理算法的更新变革,DWI 技术将在“精准化医疗”的理念下,更好地应用于临床与研究,在脊柱疾病的诊断、鉴别、预后方面发挥更大作用。

4 参考文献

1. Hahn EL. Spin echoes[J]. Physics Today, 1950, 3(12): 21-21.
2. Stejskal EO, Tanner JE. Spin diffusion measurements: spin echoes in the presence of a time-dependent field gradient[J]. J Chem Phys, 1965, 42(1): 288-292.
3. Le BD, Breton E, Lallemand D, et al. MR imaging of intravoxel incoherent motions: application to diffusion and perfusion in neurologic disorders[J]. Radiology, 1986, 161 (2): 401-407.
4. Nagayoshi K, Ito Y, Monzen Y, et al. Delineation of the white and gray matter of the normal human cervical spinal cord using diffusion-weighted echo planar imaging [J]. Nihon

- Igaku Hoshasen Gakkai Zasshi, 1998, 58(11): 578-580.
5. 姚婧. 脊柱转移瘤的研究进展与影像学评价[J]. 临床放射学杂志, 2017, 36(3): 435-438.
 6. Suh CH, Yun SJ, Jin W, et al. ADC as a useful diagnostic tool for differentiating benign and malignant vertebral bone marrow lesions and compression fractures: a systematic review and meta-analysis[J]. Eur Radiol, 2018, 28(7): 2890-2902.
 7. 卢莹莹, 吴春根, 申玉兰, 等. 探讨磁共振扩散加权成像在鉴别良恶性椎体骨折中的诊断价值[J]. 临床放射学杂志, 2017, 36(6): 861-865.
 8. 孙中仪, 陈伯华, 胡有谷, 等. 中国脊柱脊髓损伤数据库对急性脊髓损伤病人的分析价值[J]. 青岛大学医学院学报, 2012, 48(2): 115-117.
 9. 赵细辉, 陈昆涛. 磁共振扩散成像及磁敏感加权成像在脊髓损伤中的应用[J]. 国际医学放射学杂志, 2015, 38(5): 423-426.
 10. 杨蔚, 金国宏, 李德刚, 等. 急性颈髓损伤的扩散张量成像表现与神经功能改变的相关性[J]. 中国医学影像技术, 2010, 26(12): 2263-2266.
 11. Zhang JS, Huan Y. Multishot diffusion-weighted MR imaging features in acute trauma of spinal cord[J]. Eur Radiol, 2014, 24(3): 685-692.
 12. Schwartz ED, Hackney DB. Diffusion-weighted MRI and the evaluation of spinal cord axonal integrity following injury and treatment[J]. Exp Neurol, 2003, 184(2): 570-589.
 13. Nukala M, Abraham J, Khandige G, et al. Efficacy of diffusion tensor imaging in identification of degenerative cervical spondylotic myelopathy[J]. Eur J Rad Open, 2019, 6(1): 16-23.
 14. 张劲松, 钱蕴秋, 宣怡, 等. 扩散加权成像在脊髓型颈椎病中的应用[J]. 放射学实践, 2005, 20(9): 757-760.
 15. 王宇鸣, 邹海波, 李中实. 磁共振弥散张量成像技术在颈椎外科应用的研究进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2017, 27(6): 561-565.
 16. Johnson RW, Suva LJ. Hallmarks of Bone Metastasis [J]. Calcif Tissue Int, 2017, 102(2): 141-151.
 17. 游斌, 吴小丽, 王荣靖, 等. 核素骨显像与 MRI 对脊柱转移瘤检出率的比较[J]. 中外医学研究, 2017, 15(1): 57-58.
 18. Pozzi G, Albano D, Messina C, et al. Solid bone tumors of the spine: diagnostic performance of apparent diffusion coefficient measured using diffusion-weighted MRI using histology as a reference standard[J]. J Magn Reson Imaging, 2018, 47(4): 1034-1042.
 19. 卢莹莹. 椎骨病变磁共振扩散加权成像的研究进展[J]. 临床放射学杂志, 2017, 36(6): 861-865.
 20. Byun WM, Shin SO, Chang Y, et al. Diffusion-weighted MR imaging of metastatic disease of the spine: assessment of response to therapy [J]. Am J Neurorad, 2002, 23 (6): 906-912.
 21. 张禹, 康健, 李大圣, 等. 骨巨细胞瘤的 MRI 成像特点及临床价值[J]. 实用医学杂志, 2010, 26(19): 3580-3583.
 22. 汤文瑞, 张焱, 程敬亮, 等. DCE-MRI 和 DWI 对骶骨脊索瘤与骨巨细胞瘤的鉴别诊断价值[J]. 放射学实践, 2018, 33(3): 280-284.
 23. 吕金纯, 陈浩, 邱乾德, 等. MRI 弥散加权成像在骨肌肿瘤诊断中的应用[J]. 医学影像学杂志, 2015, 25(9): 1686-1690.
 24. 闫坤, 胡莎莎, 杨品, 等. 磁共振扩散峰度成像在肿瘤中的研究进展[J]. 磁共振成像, 2016, 7(8): 635-640.
 25. 杨虹, 李雪霜, 陆通, 等. CT 与 MRI 对脊柱结核的诊断价值[J]. 磁共振成像, 2016, 7(8): 593-597.
 26. Huijun Z, Zenghui L. Atypical imaging of spinal tuberculosis: a case report and review of literature[J]. Pan Afr Med J, 2016, 24: 101.
 27. 刘莹, 王云玲, 王红, 等. MR 弥散加权成像在兔脊柱结核早期诊断中的应用价值[J]. 磁共振成像, 2011, 2(6): 435-438.
 28. Madhok R. Evaluation of apparent diffusion coefficient values in spinal tuberculosis by MRI[J]. J Clin Diagn Res, 2016, 10(8): 19-23.
 29. 袁雁, 徐慧, 楼俭茹. 布氏杆菌性脊柱炎与脊柱结核的影像特征差异分析[J]. 新疆医科大学学报, 2016, 39(9): 1115-1118.
 30. 张文. MRI 及 MR-DWI 在布氏杆菌性脊柱炎与脊柱结核鉴别诊断中的应用价值[D]. 宁夏医科大学, 2019.
 31. 吴朋, 张玉姣, 秦芳, 等. 弥散张量成像对布氏杆菌脊柱炎椎间盘病变的诊断价值及疗效评估 [J]. 中国医学科学院学报, 2018, 40(4): 519-527.
 32. 徐敏, 熊绪, 张钰, 等. 非特异性脊柱感染误诊为脊柱结核八例分析[J]. 临床误诊误治, 2016, 29(4): 46-48.
 33. 孙厚杰, 蔡小军, 韩建华, 等. 非特异性脊柱感染的诊断与治疗[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2013, 23(6): 508-513.
 34. Eastwood JD, Vollmer RT, Provenzale JM. Diffusion-weighted imaging in a patient with vertebral and epidural abscess [J]. Am J Neuroradiol, 2002, 23(3): 496-498.
 35. Byvaltsev VA, Stepanov IA, Kalinin AA, et al. The use of apparent diffusion coefficient in diagnosis of lumbar intervertebral disk degeneration in patients with middle and old age by diffusion weighted MRI[J]. Adv Gerontol, 2018, 31(1): 103-109.
 36. 张青波, 李伟, 曹云, 等. 表观弥散系数在腰痛患者腰椎间盘退变评估中的应用价值[J]. 实用骨科杂志, 2018, 24(6): 564-569.
 37. Viallon M, Cuvinciuc V, Delattre B, et al. Erratum to: State-of-the-art MRI techniques in neuroradiology: principles, pitfalls, and clinical applications [J]. Neuroradiology, 2015, 57(10): 1075-1075.
 38. 魏祖生. 磁共振扩散加权成像技术的应用进展[J]. 系统医学, 2018, 3(13): 190-192.

(收稿日期:2019-07-27 修回日期:2019-10-14)

(本文编辑 彭向峰)